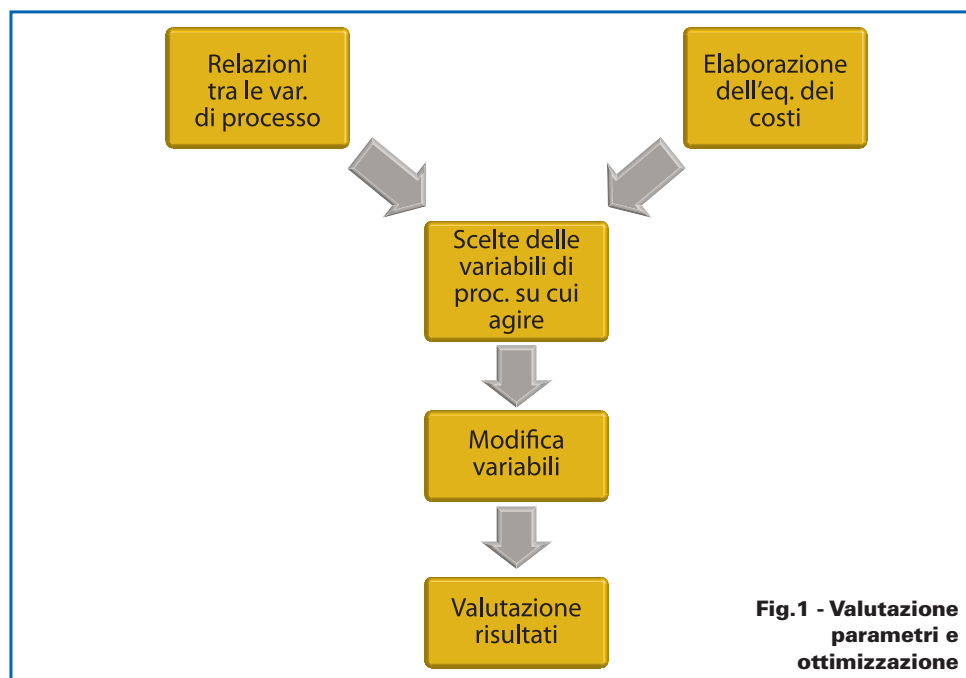


# QUANTO COSTANO LE LAVORAZIONI SLS

IL LAVORO SI PROPONE DI EFFETTUARE UN'ANALISI PRELIMINARE DEL RUOLO GIOCATO DAI PARAMETRI DI PROCESSO NELLA STIMA DEI COSTI DELLE LAVORAZIONI SLS SU SABBIA RIVESTITA E NYLON. DI CONSEGUENZA SI VALUTERÀ QUALI SARANNO I PARAMETRI OPPORTUNI DA MODIFICARE PER OTTIMIZZARE LA PRODUZIONE DAL PUNTO DI VISTA ECONOMICO; INOLTRE SI FARÀ UN'ANALISI QUALITATIVA DEI RISULTATI DELLE MODIFICHE

**L**a caratteristica fondamentale dei processi di prototipazione rapida è la capacità di produrre dei pezzi (di solito in serie limitate) in tempi brevi, accorciando drasticamente l'intervallo di tempo che intercorre tra la fase di progettazione e l'uscita del pezzo finito. Il tempo fabbricazione riveste un'importanza fondamentale nell'ambito strettamente prototipico (i prototipi devono essere disponibili in poche ore), ma ha anche un impatto economico generale in quanto è relazionato alla produttività e alle energie in gioco nel processo, l'ottimizzazione economica dà risultati che possono differire da quelli riguardanti l'ottimizzazione energetica. In ogni caso è possibile elaborare un'equazione indicativa dell'influenza dei parametri di processo sul costo della lavorazione.

In funzione delle indicazioni date da quest'equazione e dalle caratteristiche del processo è possibile scegliere le variabili su cui agire per ottimizzare il processo stesso.



**Fig.1 - Valutazione parametri e ottimizzazione**

## Selective laser sintering: generalità e parametri di processo

Il processo di selective laser sintering (SLS) è un metodo di prototipazione rapida di tipo additivo, e si svolge secondo le seguenti fasi cicliche:

- deposizione di uno strato omogeneo (layer) di materiale sinterizzabile (es. sabbia pre-rivestita, nylon o altre polveri polimeriche) di spessore definito
- sinterizzazione tramite un fascio laser della sezione desiderata, che permette di far aderire lo strato appena solidificato a

quello immediatamente inferiore.

I parametri di processo e alcuni parametri derivati sono descritti rispettivamente in tabella 1 e tabella 2.

Il termine  $E_d$  esprime la quantità di energia per unità di superficie, e considera la potenza del laser in relazione al tempo effettivo per cui la zona considerata è esposta al raggio; è riferito alla potenza nominale del laser quindi racchiude al suo interno l'energia persa per conduzione, convezione e irraggiamento.

I dati sperimentali in [1] esprimono, per sabbia pre-rivestita e nylon, la profondità  $d$  e delle larghezza  $w$  di sinterizzazione ottenuti per vari valori della  $E_d$ , inoltre danno un limite superiore alla  $E_d$ , coincidente col valore in cui la parte superiore del polimero inizia a fondere a causa di un eccesso di energia fornita.

3 - Relazioni tra le variabili di processo

Utilizzando i tabulati dei dati sperimentali sulla sinterizzazione di sabbia pre-rivestita e nylon [1] è possibile ricavare delle equazioni che rapportano la densità di energia utilizzata allo spessore e alla larghezza sinterizzata. In fig. 1-4 si riportano le funzioni quadratiche che interpolano tali dati sperimentali.

3.1 - Nylon

Per il nylon la profondità cresce più rapidamente della larghezza all'aumentare di  $E_d$ , ma si stabilizza intorno a 0,45 per valori di  $E_d$  superiori a 0,1 viste le equazioni esposte finora si può constatare facilmente che  $E_d$  è inversamente proporzionale alla  $V_s$  (una passata più veloce trasmette meno calore), quindi ci sarà un valore di  $E_d$  in grado di massimizzare la produttività volumetrica, data da  $d \cdot w \cdot V_s$ .

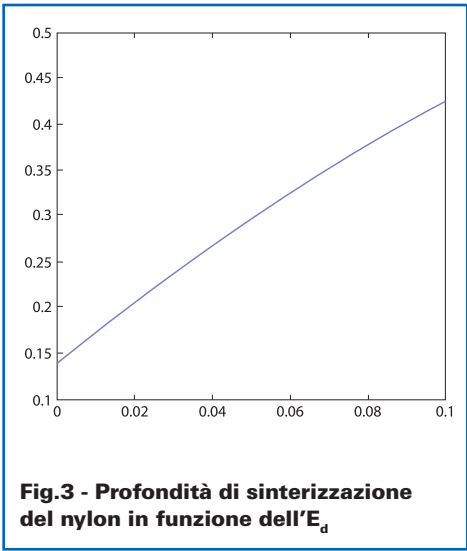
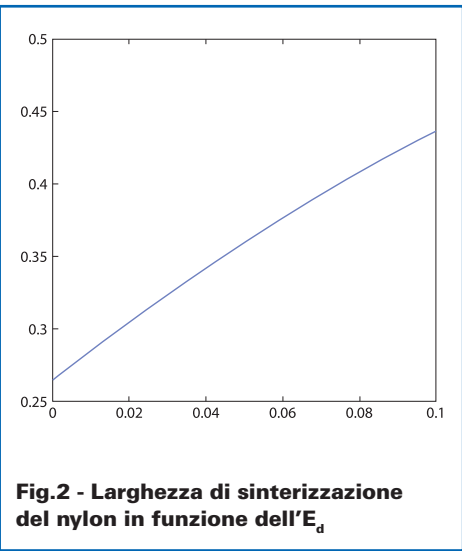
Nel caso in questione (nylon), il valore massimo di produttività volumetrica è di 205 mm<sup>3</sup>/s e si ottiene per valori di  $E_d=0,08$  J/mm<sup>2</sup> con i relativi valori di profondità e larghezza:

$d=0,4$  mm

$w=0,45$  mm

TABELLA 1		
simbolo	parametro	unità di misura
$\phi$	spot del raggio laser	mm
$V_s$	velocità scansione	$\frac{mm}{s}$
$P$	potenza del raggio	W
$s$	spessore del layer	mm
$w$	larghezza sinterizzata	mm
$d$	profondità di sinterizzazione	mm

TABELLA 2			
simbolo	espressione	parametro	unità di misura
$t^*$	$\frac{\phi}{V_s}$	tempo di esposizione al raggio	s
$P_s$	$\frac{P}{\phi V_s t} = \frac{P}{\phi^2}$	potenza per unità di superficie	$\frac{W}{mm^2}$
$E_d$	$P_s t = \frac{P}{\phi V_s}$	energia trasmessa per unità di superficie	$\frac{J}{mm^2}$



3.2 - Sabbia pre-rivestita

Per la sabbia pre-rivestita si instaura un comportamento asintotico per valori di  $E_d$  superiori a 0,12 J/mm<sup>2</sup>.

A differenza del nylon abbiamo un andamento profondamente diverso tra profondità e larghezza in quanto quest'ultima cresce più rapidamente per arrivare a un valore asintotico doppio rispetto a quello della profondità, questo è dovuto alle caratteristiche isolanti della sabbia pre-rivestita che ostacolano la trasmissione del calore in profondità.

in questo caso i valori che massimizzano

la produttività volumetrica sono:

$V_p=250$  mm<sup>3</sup>/s

$E_d= 0,14$  j/mm<sup>2</sup>

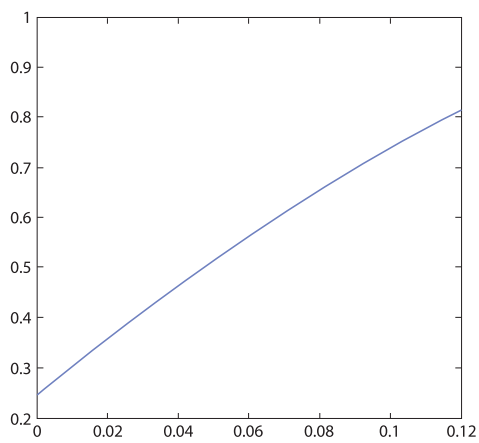
$d=0,45$  mm

4 - Elaborazione dell'equazione dei costi

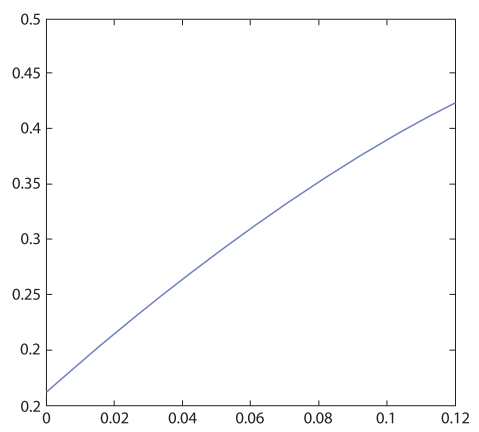
Nell'elaborazione dell'equazione dei costi sono stati considerati i seguenti fattori. L'equazione dei costi assume questa forma generale

$$C = (C_m \cdot t) + C_{op} \cdot t + \frac{P \cdot t}{60000} \cdot C_e$$





**Fig.4 - Larghezza di sinterizzazione della sabbia in funzione dell' $E_d$**



**Fig.5 - Profondità di sinterizzazione della sabbia in funzione dell' $E_d$**

## Caratterizzazione del termine t

Il termine t è definito come il tempo necessario per sinterizzare un solido di volume unitario, con l'aggiunta del tempo necessario per la deposizione del layer

$$t = \frac{1}{V_s w d} + t_d \cdot \frac{1}{d}$$

Sostituendo nel termine t gli andamenti di w ricavati dai dati sperimentali appare evidente che la variabile su cui è necessario agire per avvicinarsi alle condizioni ottimali è la profondità di sinterizzazione d, in quanto è quella che ha il maggiore impatto sulla diminuzione dei costi.

**TABELLA 3**

simbolo	espressione	unità di misura
$C_m$	$\frac{C_{macchina}}{\text{tempo}} = \frac{C_{ammort}}{3600 N_h A}$	$\frac{\text{Euro}}{s}$
$C_{op}$	costo operatore	$\frac{\text{Euro}}{s}$
t	tempo di lavorazione	s
$C_e$	costo energia	$\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$

## 5 - Variazione della profondità di sinterizzazione

I processi di SLS, lavorando per sovrapposizione di strati, presentano degli scostamenti intrinseci dalle condizioni di progetto, ovvero ci sono dei limiti nell'accuratezza superficiale legati principalmente allo spessore del layer, che di solito viene fissato a priori secondo criteri empirici.

In questa parte di trattazione si considererà la variazione dello spessore del layer (slicing adattivo) durante la lavorazione, per massimizzare la velocità di processo mantenendo costante l'accuratezza superficiale minima richiesta.

### 5-1 Accuratezza superficiale in funzione dell'inclinazione della superficie

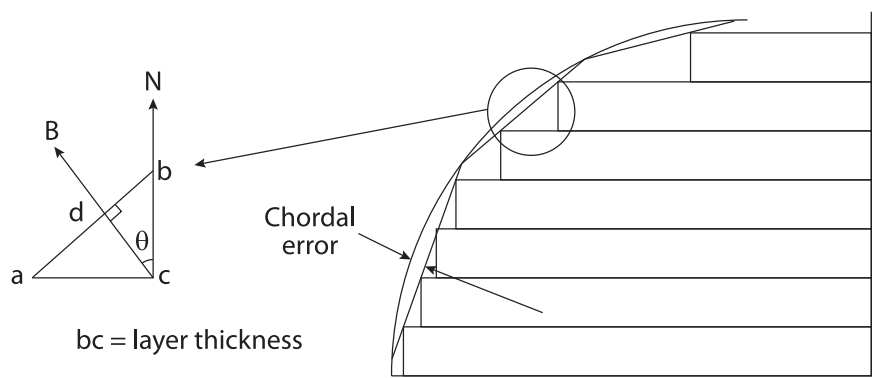
Utilizzando lo schema di fig. 6 è possibile quantificare per ogni strato lo scostamento della superficie reale da quella progettata al CAD; di conseguenza è possibile svi-

luppare, durante la lavorazione di un solido, l'andamento dello spessore del layer capace di garantire un'accuratezza costante. In altri termini lo spessore sarà massimo dove l'inclinazione è minima ( $\theta \rightarrow 90^\circ$ ), mentre nei punti in cui l'orientazione della superficie varierà più velocemente ci saranno degli spessori più piccoli.

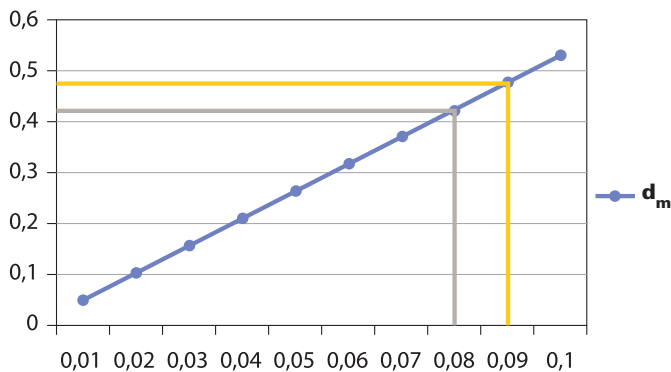
Nella seguente analisi verranno valutati gli effetti dello slicing adattivo su una sfera, e verrà fatto un confronto dei tempi, a parità di accuratezza superficiale, con una lavorazione a slicing fisso.

### 5-2 Andamento spessore slice

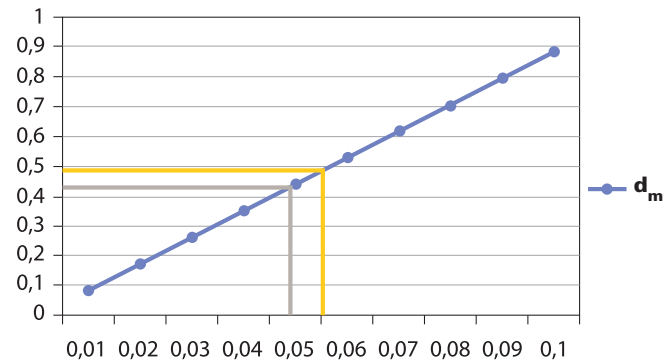
Variando la profondità di sinterizzazione d in funzione dell'inclinazione della superficie, si è in grado di lavorare con spessori delle slice più grandi per la maggior parte del processo, senza influire sulla accuratezza superficiale minima richiesta, questo vantaggio comporta un aumento dello spes-



**Fig.6 - Errore in funzione dell'inclinazione della superficie [2]**  
 $\delta = bc \cos(\theta) = d \cos(\theta)$



**Fig. 7 - Andamento dello spessore medio del layer in funzione di  $\delta$  per una sfera avente raggio=100 mm". In giallo sono indicati i valori per la sabbia, in grigio quelli per il nylon.**



**Fig. 8 - andamento dello spessore medio del layer in funzione di  $\delta$  per una sfera avente raggio=500 mm". In giallo sono indicati i valori per la sabbia, in grigio quelli per il nylon.**

sore medio di sinterizzazione  $d_m$ .

I valori ottimali di  $d_m$  sono quelli che si avvicinano ai picchi di produttività volumetrica visibili nelle figure 9 e 10.

In riferimento alle condizioni di massima produttività volumetrica e accuratezza superficiale è possibile fare un confronto tra tempo di produzione con slicing adattivo e tempo necessario con slicing fisso, valutando il risparmio di tempo in percentuale. Utilizzando i valori indicati al paragrafo 3 e ipotizzando un tempo di stesura della polvere  $t_d=5$  s, si ottengono i tempi indicati di tab. 4.

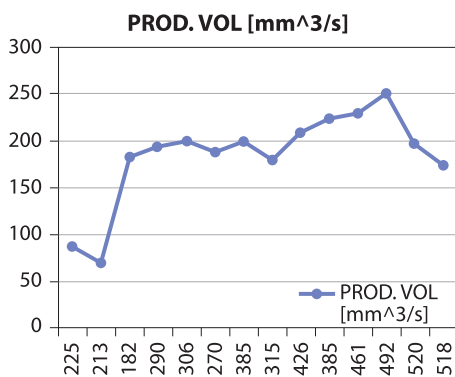
## Conclusioni

Dopo aver analizzato i singoli parametri di processo relativi al SLS e le loro interazioni, si è valutato qualitativamente l'effetto dello slicing adattivo sui tempi di processo e sull'accuratezza superficiale, mettendo in evidenza, nei casi di alta accuratezza dimensionale e solidi con variazione dell'inclinazione della superficie, importanti variazioni dei tempi di lavorazione che ne suggeriscono l'applicazione, laddove sia possibile tecnicamente controllare lo spessore dello strato di polvere depositato. ■

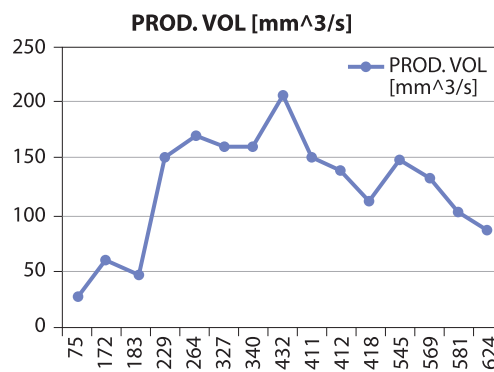
© RIPRODUZIONE RISERVATA

**TABELLA 4**

Materiale	Slicing fisso	Slicing adattivo	Tempo risparmiato
Sabbia	29 h	6,5 h	77,00%
Nylon	39 h	8 h	80,00%



**Fig. 9 - Produttività volumetrica in funzione dello spessore di sinterizzazione (sabbia)**



**Fig. 10 - Produttività volumetrica in funzione dello spessore di sinterizzazione (nylon)**

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Franco, A.; Lanzetta, M.; Romoli, L.: *Experimental Analysis of Selective Laser Sintering of Polyamide Powders: an Energy Perspective*, Journal of Cleaner Production, 18, 16-17, November 2010, pp. 1722-1730 (9). ISSN: 0959-6526, 10.1016/j.jclepro.2010.07.018
- [2] Choi, S.H., Samavedan, S., *Modelling and optimisation of Rapid Prototyping*, Computer in industry 47 (2002)
- [3] Xu, F., Wong, Y.S., *Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing*, Journal of manufacturing systems vol.19/No.5 (2000) 283-296
- [4] Steen, W.M., *Laser Material Processing*, Springer-Verlag (1998)
- [5] Dini, G.; Franco, A.; Lanzetta, M.; Santochi, M.; Tantussi, G.: *An Analytical Model of Selective Laser Sintering (SLS) of Pre-Coated Sands for Shell-Moulding*, A.I.Te.M V, 2001, ISBN: 88-900637-0-X, 113-128.
- [6] Chunze Yan, Yusheng Shi, Jingsong Yang, Jinhui Liu, *Preparation and selective laser sintering of nylon-12 coated metal powders and post processing*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 209, Issue 17, 19 August 2009, Pages 5785-5792, ISSN 0924-0136, 10.1016/j.jmatprotec.2009.06.010.

Progetto dello studente M. Statzu per il corso di Studi di Fabbricazione a.a. 2010-11, laurea specialistica in Ing. Meccanica.